

正交混频相位式激光测距方法与系统实现

刘 邈 杨学友 刘常杰

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 针对传统的二次混频式激光测距仪鉴相精度不高, 难于消除系统误差等问题, 提出了正交混频相位激光测距法, 利用成熟的正交调制技术进行激光光强的幅度调制, 提高了基于二次混频原理的激光测距仪的鉴相精度, 并且通过改变低频信号相位来获得两个相对很小的频差, 易于消除系统附加相移, 大大简化了二次混频式激光测距仪的硬件设计。详细阐述了基于正交混频相位测距方法的激光测距原型机设计要点。系统原型机设计方案采用了集成度很高的正交调制芯片完成, 结构紧凑没有冗余元件。原型机实验精度达到 ± 1.52 mm, 在 62.5 MHz 频点下测相精度达到 0.042° , 并且可以很方便地通过加入多频调制的方法大大提高测量距离, 是采用二次混频法进行相位激光测距的优秀解决方案。

关键词 测量; 激光测距; 正交混频; 相位测量; 光电混频

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0208004

Phase Shift Laser Range Finding with a Novel Quadrature Modulation Method and System Implementation

Liu Miao Yang Xueyou Liu Changjie

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Traditional laser range finder based on two-step frequency mixing has a poor phase measuring accuracy and it is difficult to eliminate systematic errors. A novel quadrature modulation method to achieve amplitude modulation of laser intensity is proposed. This method improves the accuracy of phase measuring and greatly simplifies the hardware design of laser range finder based on two-step frequency mixing. Design features of the prototype have been expounded in detail. A highly integrated quadrature modulator chip is used in prototype design, making the whole system compact and with no redundant components. The measured accuracy approaches ± 1.52 mm when the modulation frequency is 62.5 MHz and the dynamic range can be improved by multimodulated frequency method as revealed by a detailed analysis.

Key words measurement; laser range finding; quadrature modulation; phase measurement; optoelectronic mixing

OCIS codes 280.3640; 280.3400; 280.5600

1 引 言

激光测距仪在很多领域都有着广泛的应用。激光测距仪虽然种类繁多, 但从工作原理上分只有三种: 三角法, 飞行时间法和干涉法。其中相位测距法因为其较高的精度, 普适性很好的工作距离, 测距原

理的溯源性以及易于小型化的特点, 在整个激光测距仪家族中有着不可替代的地位。相位法依靠对激光光强使用周期信号进行调制, 测量周期信号的相移来间接推算距离, 精度可以达到毫米量级。在相位式激光测距仪的设计中一类问题就是由于调制频

收稿日期: 2011-08-11; 收到修改稿日期: 2011-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(50735003)资助课题。

作者简介: 刘 邈(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光测距与光电传感器应用等方面的研究。

E-mail: excalibur_s@tju.edu.cn

导师简介: 杨学友(1949—), 男, 博士, 教授, 主要从事视觉检测技术及应用、高速图像处理、测试及控制网络技术等方面的研究。E-mail: xueyouy@tju.edu.cn

率对应的光测尺长度有限,相位测量被限制在 $0 \sim 2\pi$ 之间,整波数无法测得,即调制频率决定了相位激光测距仪的不模糊距离。解决测尺长度有限的方法很多,可以利用多个调制频率先粗测后精测等^[1]。

提高相位式激光测距仪测距精度最直接的办法是缩短光测尺的长度,也就是提高调制频率。但先前的研究证明,最终的测距精度并不和调制频率成正比,而是呈现非线性关系,究其原因主要有以下几个方面:随着调制频率的上升,电路元器件呈现的非线性和带宽的限制会降低光强的调制深度,使得接收后进一步衰减的信号的相移检测变得困难;高频电路的各种分布参数产生的相位测量误差变化范围较大,不易补偿。换句话说,随系统调制频率的提高,系统测相精度会降低,在提高调制频率的过程中,总会出现一个频点的测距精度最高。随后若再提升调制频率,由于测相精度下降得更快,系统整体的精度会不升反降。另一个影响精度的重要因素是整个电路系统的附加相移,这个相移与测距相移在一个数量级上,并且受温度等外界环境影响而变化^[2],必须加以检测并消除才可以使仪器输出具有一定精度的绝对测量结果。

在经典的二次混频式激光测距仪中,要完成的任务大体分为以下几步:低频信号生成,上变频,调制发射,接收放大,下变频,低通滤波,数模转换,数据处理。每一步都会产生误差,系统较为复杂。传统的混频实现方式经历了模拟乘法器,双平衡混频器,光电器件直接混频(下变频)^[3,4]。就目前发展状况有如下两大缺陷:完成绝对距离量的输出需要参考光路或是另外一路冗余的接收电路,系统复杂、成本高;无论采用传统解调或者正交解调,测量信号总要在一个点进入不同的信号通路,导致系统相移的细微差别而大幅降低测相精度。若要进一步提高精度,应在方法与器件应用上下功夫,尽量减小设计复杂度,让测量信号从始至终走同一条信号通路。根据以上两个缺点加以改进,就是要将信号通路缩减为一条,也就是精简解调部分,将正交解调的过程转移到调制发射上,通过牺牲一些测量速度换来精度的大幅提高。

本文提出一种新颖的方法生成激光器的调制信号,使用在通信领域非常成熟的正交调制技术,使得最终的相移检测可以工作在一个很低的频率下(若干千赫兹),便于数字化测相算法的实现和测相精度的提高,不需要使用昂贵的高速模数(AD)转换电路[比如采样频率在 10 MS/s 以上的模数转换器件

(ADC)],并且通过使用正交调制的手段生成两个相对频差很小的调制信号(小频差导致的系统误差可以忽略),消去了绝大部分系统元器件导致的附加相移,省去了繁琐的内光路设计和冗余传感器补偿。

2 正交混频测距法原理和系统实现要点

2.1 正交混频相位测距原理

相位式激光测距仪的距离和分辨率分别表示为

$$D = [c/(2f_0)] \times [\varphi/(2\pi)], \quad (1)$$

$$\delta d = [c/(2f_0)] \times [\delta\varphi/(2\pi)], \quad (2)$$

式中 c 为光速,测距系统需要一个高精度高稳定的本振信号作为测量基准。设本振信号频率为 f_0 ,角频率 ω_0 ,则本振信号可以表示为 $\sin \omega_0 t$ 。将本振信号移相 90° 后,成为两路正交高频信号,为区别于本振信号,待混频的两路正交信号表示为 $\sin \omega_H t$ 和 $\cos \omega_H t$,并且从这里开始计算系统附加相移。

系统附加相移由信号通路中每一个功能电路模块的相频特性曲线决定,具体关系非常复杂,本文对信号通路中产生的附加相移的值做一个梳理,只考虑相移值的符号随角频率值的变化。

系统还需要两路正交的低频测量信号做相位鉴别的载体,设这两路信号角频率为 ω_L ,则两路正交低频信号表示为 $\sin \omega_L t$ 和 $\cos \omega_L t$,两路低频测量信号分别与高频测量信号混频后相加(正交调制过程),混频的过程可表示为

$$\begin{aligned} \cos \omega_L t \sin \omega_H t + \cos \omega_L t \cos \omega_H t = \\ \cos(\omega_H t - \omega_L t). \end{aligned} \quad (3)$$

考虑调制过程的插入损耗和附加相移,最终信号为

$$\alpha_1 \cos(\omega_H t - \omega_L t + \theta_{1'} - \theta_1), \quad (4)$$

式中 $\theta_{1'}$ 是依附于角频率 $\omega_H t$ 的附加相移分量, θ_1 是依附于角频率 ω_L 的附加相移分量。从而得到频率为 $(f_H - f_L)$ 的高频信号。

该信号被调制发射,打在目标物上发生反射,被接收器接收到,整个过程的相移反映了被测距离的大小,即

$$\alpha_2 \cos(\omega_H t - \omega_L t + \theta_{2'} - \theta_2 + \varphi), \quad (5)$$

将此信号与先前的一路待混频正交信号进行第二次混频,完成下变频过程(变频后系统附加相移变为 θ_3 ,衰减系数为 α_3):

$$\begin{aligned} \alpha_2 \cos(\omega_H t - \omega_L t + \theta_{2'} - \theta_2 + \varphi) \sin \omega_H t \rightarrow \\ \frac{1}{2} \alpha_3 \sin(2\omega_H t - \omega_L t + \theta_{3'} - \theta_3 + \varphi) - \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2}\alpha_3 \sin(-\omega_L t + \theta_3 + \varphi), \quad (6)$$

下变频使得测距相移 φ 转移到低频上 f_L , 为鉴相创造了便利。

经过低通滤波后的信号(经过滤波器附加相移变为 θ_4 , 衰减系数变为 α_4)为

$$-\frac{1}{2}\alpha_4 \sin(-\omega_L t - \theta_4 + \varphi), \quad (7)$$

为求出测距相移 φ , 需要计算 θ_4 。为达到这个目的, 可以对低频测量信号的相位

$$-\sin \omega_L t, \quad \cos \omega_L t \quad (8)$$

进行一些改变, 将两路信号与两路正交高频信号进行正交混频, 依据(3)式, 得到混频后的信号为

$$\alpha_1 \cos(\omega_H t + \omega_L t + \theta_1' + \theta_1), \quad (9)$$

同样经过发射和接收, 根据(5)式, 二次混频的过程与第一次一致:

$$\begin{aligned} & \alpha_2 \cos(\omega_H t + \omega_L t + \theta_1' + \theta_1 + \varphi) \sin \omega_H t \rightarrow \\ & \frac{1}{2}\alpha_3 \sin(2\omega_H t + \omega_L t + \theta_3' + \theta_3 + \varphi) - \\ & \frac{1}{2}\alpha_3 \sin(\omega_L t + \theta_3 + \varphi), \end{aligned} \quad (10)$$

低通滤波后得

$$-\frac{1}{2}\alpha_4 \sin(\omega_L t + \theta_4 + \varphi), \quad (11)$$

根据(7)、(11)式采用傅里叶变换的方法^[5]以 $\sin \omega_L t$ 为基准直接求出两次独立测量过程的相位为

$$-\theta_4 + \varphi, \quad (12)$$

$$\theta_4 + \varphi, \quad (13)$$

(12)、(13)式相加, 消掉 θ_4 , 得出测距相移 φ 。根据(1)式, 求出被测距离 D 。

2.2 测距装置设计与实现要点

正交混频式激光测距仪功能框图如图 1 所示。系统的时钟基准依靠一颗温补晶振(TCXO)获得, 频率 25 MHz, 其频率稳定度一般在 1×10^{-6} 以下, 老化率为每年 0.5×10^{-6} , 可以满足系统对频率长时间稳定度的要求。温补晶振输出作为锁相环(PLL)电路的时钟基准输入, PLL 电路联合压控振荡器(VCO)进行时钟的分频和抖动去除。时钟同步合成器(CDCM61002)联合片内 VCO 降低时钟抖动, 进行分频后, 同时驱动两路 CMOS 输出极进行输出, 分别供正交调制器和雪崩光电二极管(APD)的两次混频使用, 本振频率为 62.5 MHz。测距产生的相位差发生在这个高频信号频率上的分量将被后续系统精确测出。与此同时, 系统的总控制由一片 CPU(STM32F103RET6)承担, CPU 驱动

双路数模转换器外设(DAC)生成两路彼此正交的低频测量信号, 频率为 f_L 。这里频率 f_L 是本振信号的 1/1000 甚至更低, 因为要进行两次独立的测量, 为保持独立测量所产生的附加相移基本一致, 需要两次测量的高频信号频率差值越小越好。两路低频测量信号被输入正交调制器(LT5598)中进行正交混频, 两次测量得到 $(f_H - f_L)$ 和 $(f_H + f_L)$ 的高频信号。由于 f_H 远高于 f_L , 其频差 $2f_L$ 引起的系统频移的差值相对 f_H 上的频移可以忽略。另外, 使用正交调制器, 等效于使用符号函数与被调低频信号相乘, 会产生高次谐波和镜像频率。高次谐波会在后续的低通滤波器中被滤除; 镜像频率的频点就是两次测量需要的高频频点, 使用一样的后续电路即可达到抑制镜像频率的目的。使用这个信号对 650 nm 激光二极管进行直接电流调制。调制光束通过发射光路打到目标物上, 由雪崩光电二极管通过已校准成像光路捕获微弱的反射信号。在 APD 的直流偏置电压上使用交流耦合的方法馈入一路本振正弦信号, APD 作为系统的下变频混频器使用, 省去了独立的下变频混频器, 简化了系统设计并优化了噪声性能。光信号增益通过 MCU 控制高压偏置模块的串行外设数字接口(SPI), 调节 APD 偏置电压实现。经 APD 混频后的信号为微弱的电流信号, 通过高速单电源运放(OPA358)使用跨阻放大器拓扑来完成高速 I/V 变换过程。 I/V 变换后的信号通过低通滤波器(LPF)。为达到对高频分量的充分抑制, 样机采用双 CMOS 运放并附加增益的 MFB 与 Sallen-Key 结构组成 4 阶 4 极点低通滤波器, 对本振频率 62.5 MHz 的衰减超过 85 dB。通过低通滤波器后, 滤除信号的高频分量后得到含有测距相移的低频分量。使用 CPU 自带的 12 bit 1 MS/s ADC 进行连续采样, 通过分析若干个整周期的数据, 以 DAC 读取正弦表每一整周期的起始点为基准采用标准正弦表与采样数据进行最小二乘拟合来推算出本次测量的相位差(避开快速傅里叶变换的量化精度分析)。通过改变读取正弦表的起始位置, 可以精确改变输出正弦信号的相位, 从而完成互补的第二次测量, 通过运算消去系统附加相移, 得出被测距离。

2.3 实验结果与分析

实验基于 2.2 节所述装置, 由精度较高的 Leica AT901-LR 激光跟踪仪(10 m 内精度优于 0.02 mm)对一移动目标靶进行距离测定, 再由实验装置输出调制光束对目标靶进行距离测定, 通过对两组数据

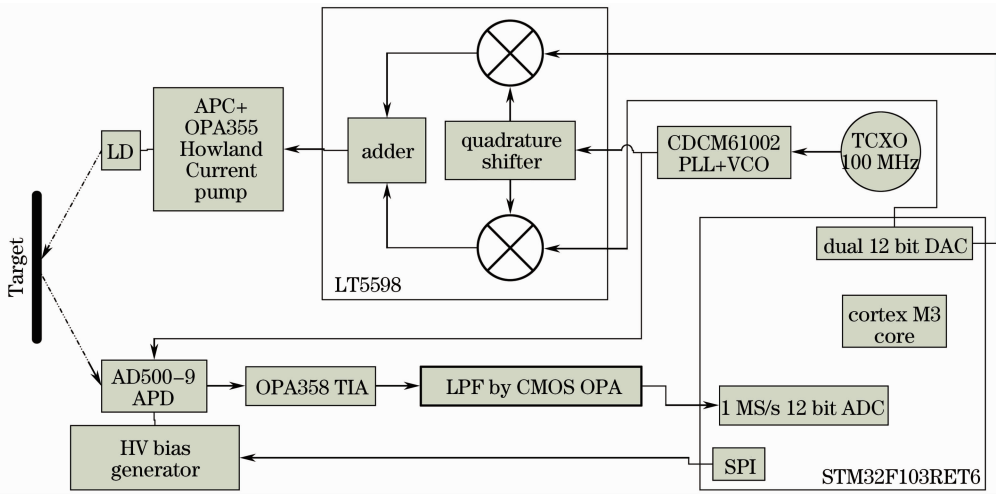


图 1 正交混频式激光测距仪功能框图

Fig. 1 Functional diagram of phase shift laser range finder with quadrature modulation

进行比对分析,得出结论。

2.3.1 调制频率与系统测量精度

为改变调制频率并且使 PLL 电路工作在设计输出范围内,将系统的 TCXO 更换为 HP8644A 高

精度射频时钟源,产生 3 种基准频率,使 PLL 电路最终输出为 50.0,62.5,75.0 MHz。使用这 3 种频率进行 3 组实验,顺次标记为 A,B,C 组。正对锁在光学直线导轨上距离为 1 m 的两个漫反射屏(使用

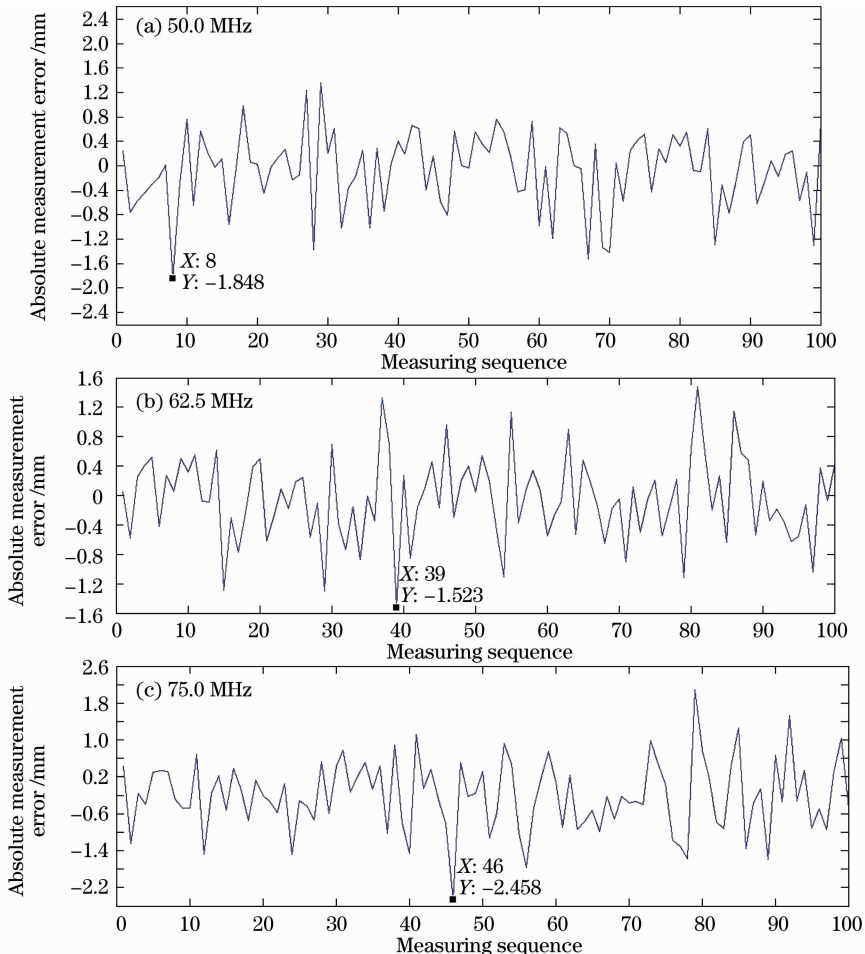


图 2 调制频率与系统测量精度

Fig. 2 Modulation frequency versus system ranging accuracy

激光跟踪仪先期标定)分别进行两次测量,两次测出的相位差相减,根据光尺长度推算出本次测量的输出。表1和图2为每组进行100次测量的结果。

表1 调制频率与系统测量精度

Table 1 Modulation frequency versus system ranging accuracy

Modulation frequency / MHz	Average / mm	Max. error / mm	Std. error / mm	Dynamic range / (V/V)
50.0	9.93	1.85	0.62	8955(0.040°)
62.5	10.04	1.52	0.57	8421(0.042°)
75.0	9.80	2.46	0.77	5194(0.070°)

测距系统的综合性能由测相动态范围表征,定义为相位差测量范围($0\sim 360^\circ$)与相位差测量分辨率的比值。

在原始数据中,平均值反映了标定后系统的溯源精度,而标准差反映了系统的分辨率和动态范围。可以看出,测相精度随调制频率的增加而降低。从

最大偏差看,系统绝对精度可达 ± 1.52 mm。从测相动态范围可以看出基于正交混频技术的测相动态范围明显优于目前二次混频式激光测距仪普遍能达到的动态范围($3000\sim 3600$)^[1,6]。

在引言中提及的最佳测距频点问题,通过简单的3组实验,从测距结果的标准差可以看出,标准差经历了一个先下降后上升的过程,而这个拐点就出现在 $50\sim 75$ MHz中间。对这个频点的进一步寻找可以做大量的实验并最终通过定制晶振频率来完成。

2.3.2 系统线性度

暂不考虑最大不模糊距离的问题,使用定频率的TCXO设置系统工作频率为62.5 MHz,对应的光尺长度为4.8 m,以系统光路前端为基准零点进行标定,漫射屏分别使用激光跟踪仪和本系统进行测量并比对差值,从 $0.2\sim 6.0$ m,以 0.2 m为步进行重复测量。测量相位输出如图3所示。

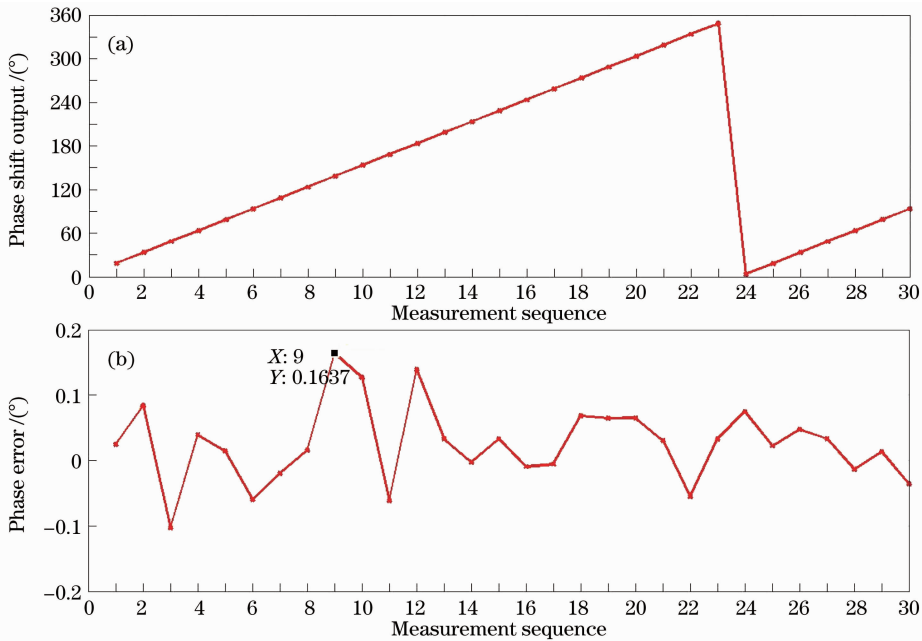


图3 测相线性度。(a)相移输出;(b)相位误差

Fig. 3 Phase measuring linearity. (a) Phase shift output; (b) phase error

从线性度测量结果可以看出,在较短的距离内并且激光准直良好时,基于正交混频的相位测距方法在原型机的硬件实现上不存在测相精度恶化的区域,在光尺范围内拥有良好的线性度和平稳的测量精度。在邻近 0° 相位附近原型机采用最小二乘拟合合法时采用了对基准正弦表移相 90° 的方法避免了算法导致的结果跳动。验证了全数字鉴相算法相对模拟鉴相电路的优越性。

3 结 论

提出了一种基于正交混频技术的相位激光测距方法并推导了算法原理公式。针对此原理进行了系统设计要点的分析。设计了原型机并实验验证了本方法的精度全面优于使用传统调制手段的相位激光测距系统。采用正交混频法设计测距系统可以使最终设计方案紧凑,完全省去了内光路,使用正交调制器对激光器进行调制,通过改变低频测量信号的相

位来形成两次相对频差很小的高频调制信号,并进行数字差分运算,从而最大限度地减小了系统误差和环境影响。实验中原型机系统工作绝对精度达到 ± 1.52 mm。若考虑提升系统的测距动态范围,可以额外采用工作频率更低的,甚至是可编程频率输出的PLL芯片来输出多个更低频率的调制光波(多频测距法),利用同样的原理可以达到更大尺度内的测量,而且由于本方法鉴相动态范围较宽,粗测尺的数量可以相应减少,降低了硬件成本和设计复杂度。

基于正交混频技术的相位式激光测距仪设计思路非常适合紧凑的便携式激光测距仪设计,并把便携式激光测距仪的精度提升到了一个新的高度。本文所述系统设计充分考虑了实际工作时的各种情况,可以作为产品设计的参考。另外,本文所述测相思路可以经过硬件的升级和数字化(如射频欠采样与数字滤波)大大提高测量速度^[7,8],是采用经典二次混频法进行相位激光测距的优秀解决方案。

参 考 文 献

1 Mang Ouyang, Chenyi Huang, Junewen Chen. High dynamic range laser range finders based on a novel multimodulated frequency method[J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(12): 123603

- 2 S. M. Nejad, K. Fasihi. A new design of laser phase-shift range finder independent of environmental conditions and thermal drift [C]. Proceedings of the 9th Joint Conference on Information Sciences, 2006. PNC-38
- 3 D. Castagnet, H. Tap-Beteille, M. Lescure. Avalanche-photodiode-based heterodyne optical head of a phase-shift laser range finder[J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(4): 043003
- 4 H. Yoon, J. Hong, H. Kim *et al.*. A characteristic analysis of the laser range finder with various modulation frequencies[C]. International Conference on Control, Automation and Systems, 2008. 2280~2283
- 5 Zhang Ting, Zhang Keshu. Study of phase shift laser measuring based on Matlab[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(1): 22~27
张 婷, 张珂殊. 基于 Matlab 的相位式激光测距研究[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(1): 22~27
- 6 Zhang Zhiyong, Zhang Jing, Zhu Dayong. Laser range finder based on phase shift measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(8): 75~78
张志勇, 张 靖, 朱大勇. 一种基于相位测量的激光测距方法[J]. *光电工程*, 2006, **33**(8): 75~78
- 7 Jia Fangxiu, Ding Zhenliang, Yuan Feng *et al.*. Real time laser ranging system for moving target based on all phase Fourier transform spectrum analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2928~2934
贾方秀, 丁振良, 袁 峰 等. 基于全相位快速傅里叶变换谱分析的激光动态目标实时测距系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2928~2934
- 8 Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong *et al.*. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0514001
姜海娇, 来建成, 王春勇 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0514001

栏目编辑:何卓铭